

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-02

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

MODELADO DE GENERADORES DE FLUJO AXIAL DE PEQUEÑA POTENCIA

RICARDO H. CRIVICICH * JOSÉ L. GARCÍA ROBERTO PEGUEROLES

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional General Pacheco
Argentina

Resumen:*A través del presente trabajo se analizala validez de un modelo matemático que permita determinar las características de diseño necesarias para la construcción de pequeños generadores de imanes permanentes de flujo axial (aprox. Hasta los 2 Kw), para ser aplicado en aerogeneradores con velocidades de rotación no mayores a las 600 r.p.m.*
El presente trabajo utiliza como base de su análisis los conceptos de la teoría básica de Máquinas Eléctricas. Dado que dicha teoría ha sido desarrollada para máquinas eléctricas de flujo radial se busca verificar si la misma es aplicable o no (y en que términos) para los generadores de imanes permanentes de flujo axial.
Los resultados obtenidos se contrastaron con los resultados de los ensayos realizados sobre un generador real, corrigiendo las ecuaciones de diseño en función de los resultados experimentales, determinando de tal manera cuales son los factores y/o parámetros que necesitan ser tenidos en cuenta para obtener un modelo adecuado del generador de flujo axial.

Palabras clave:*Aerogenerador, Flujo axial, Imanes Nd*

1 INTRODUCCION

Para poder desarrollar el estudio planteado se debía decidir que generador se utilizaría como modelo base para elanálisis. En tal sentido se realizó una investigación bibliográfica para evaluarlos distintos tipos y modelos de aerogeneradorespropuestos, centrandose especialmente enaquellos de pequeña potencia. Esasí que se concluye que existeninnumerablestrabajos sobre las características de generadores de flujo axial, pero o bien no se cuentacondatosexperimentales (muchosestánbasadosensimulación computacional), o enlos casos en que dichosdatosexisten no hay modelos que lossustenten o bienestosresultan sumamente empíricos.
De esta manera se trató de determinar cual era el modelo mas extendido de generador, o por lo menos aquel que contara con una información suficiente como para poder repetir sus características constructivas de la forma mas precisa posible.
En base a este criterio se decidiótrabajar sobre elaerogeneradorpropuesto por Hugh Piggott [1].

* Ricardo H. Crivicich rcrivic@gmail.com

De los tipos propuestos por el autor se seleccionóel que este designa como modelo 2400 con una tensión de salida de aproximadamente28 Ven C.C. luegodelrectificador, ya que elmismo se destina a la carga y mantenimiento de un banco de baterías de 24 V.

2 ESQUEMA DEL GENERADOR

El generador se construye sobre dos discos de acero de bajo carbono de espesor 8 mm y diámetro 150 mm sobre el cual se pegan los imanes permanentes de forma tal que los mismos queden centrados sobre las bobinas del estator. Dichos discos son solidarios entre si y la disposición de los imanes enfrenta polos de distinto nombre, separados 22 mm entre sí, tal como se muestra en las *Figuras 1 y 2*.

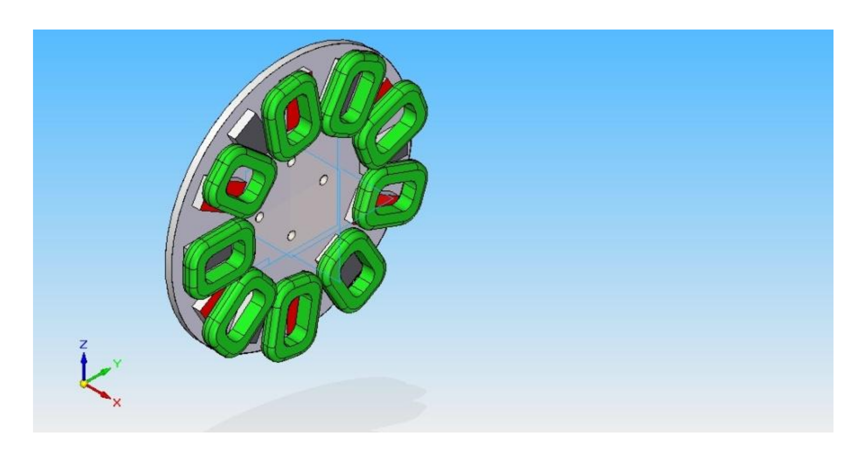


Fig. 1-Esquema delgenerador (vista frontal)

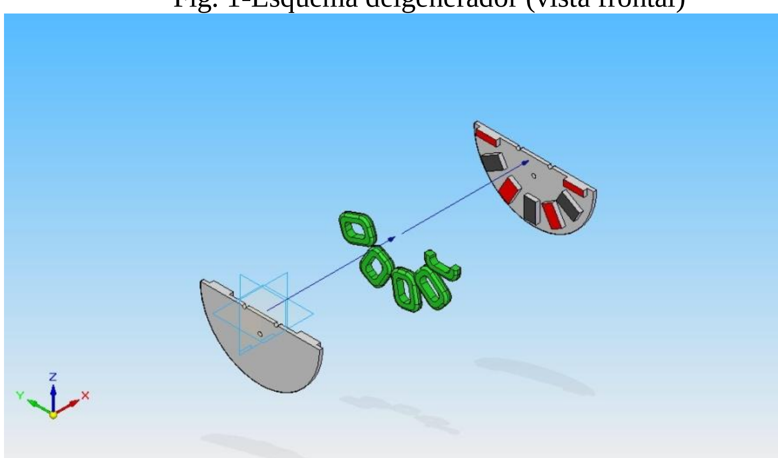


Fig. 2-Esquema delgenerador (corte)

El bobinado es trifásico y cada bobina individual tiene 45 espiras, por lo que el número total de espiras por fase es de 135.El conductor de la bobina está formado por dos alambres en paralelo de diámetro 1,5 mm de diámetro, por lo que la sección total resulta ser de 3,53 mm^2.Los imanes permanentes son rectangulares de 30x50x10 mm de aleación de Neodimio/Boro N38, con una inducción remanente de 1,26 T según el fabricante del mismo (ARTIC S.A.).

3 CÁLCULO DE LA FEM INDUCIDA EN VACÍO DEL GENERADOR EÓLICO

3.1.- Método a utilizar

Para el cálculo se emplearán las hipótesis y ecuaciones de cálculo de la teoría clásica de las máquinas rotativas de corriente alterna, tal como la desarrollada por Langsdorf [2] o Kostenko, Piotrovski [3].

3.2.- Parámetros de cálculo

Para ello y tomando como base el esquema del generador según la *Fig. 1*, tendremos (adoptando los valores correspondientes al radio medio del conjunto Imán/Bobina igual a 125 mm):

TABLA I. VALORES CARACTERISTICOS DEL GENERADOR

Paso polar τ_p (mm)	**Superficie polar (mm^2)**	**Paso de bobina Y_1 (mm)**
65,4	3270	50

3.3- Cálculo de la inducción por polo

Respecto del valor base de la inducción por polo se utilizará el método de la recta de carga del circuito magnético, tomando como referencia las curvas de magnetización del imán utilizado resulta(*Fig. 3*):

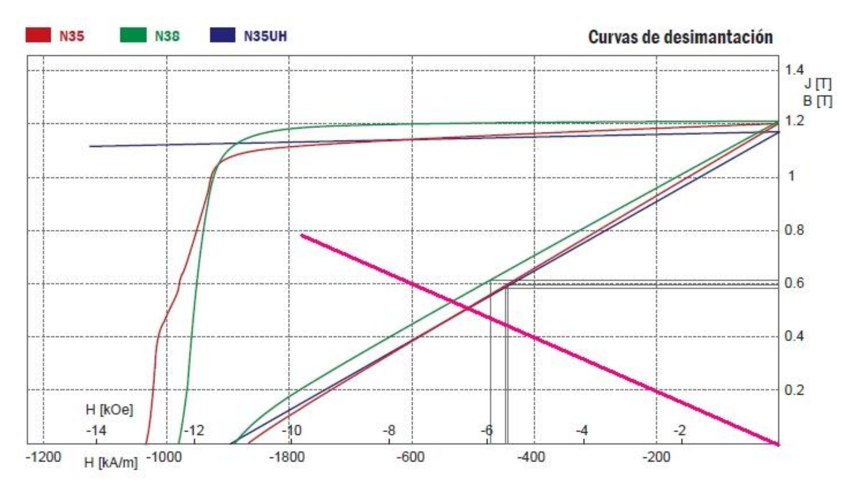


Fig. 3-Curva característica del imán

De tal manera, igualando los valores de la recta del imán con la recta de carga para un entrehierro de 22 mm y considerando un incremento del área efectiva del 10% por el efecto de borde,nos quedará para la inducción en el entrehierro: $\boldsymbol{B_g = 0,539\ T}\ [\mathbf{1}]$

Dado que el imán no ocupa todo el espacio polar se deberá tomar un factor de acortamiento, con lo que tendremosque:$\boldsymbol{\hat{B}g = 0,453\ T}\ [\mathbf{2}]$ valor pico de la inducción de 1ª armónica

Esta será entonces la inducción pico de la onda senoidal por polo que se adopta para el cálculo de la FEM.

3.4- Cálculo de la FEM inducida

Para calcular ahora la FEM inducida por bobina deberemos determinar los factores del arrollamiento (paso y distribución)y el correspondiente flujo total que afecta a la bobina estatórica. Analizando la geometría de la bobina resulta:

TABLA II. FACTORES DE ARROLLAMIENTO Y FLUJO TOTAL

Factor de paso K_p	**Factor de distribución K_d**	**Flujo total ϕ (Wb)**
0,932	0,964	9,43 x 10^{-4}

Para el cálculo de la FEM se adoptará la velocidad de referencia de 400 rpm y se sabe que por diseño el número de espiras por bobina N_b = 45. Por lo tanto:

TABLA III. FEM INDUCIDA POR FASE Y LÍNEA

Frec. (Hz)	**FEM de fase E_f (V)**	**FEM de línea E_l (V)**
40	20,31	35,18

Si consideramos la tensión de fase, la máquina en cuestión tendrá una “constante de generación” de:

$$C_g = \frac{E_f}{n} = \frac{20,31}{400} = 0,0508\ V/rpm\ [3]$$

4 CÁLCULO DE PARÁMETROS PARA LA MÁQUINA EN CARGA

4.1- Resistencia de armadura

Para el cálculo de la resistencia de armadura se determina la longitud de la espira media del arrollamiento, que resulta ser igual a 0,24 mcon lo que la resistencia de armadura a 20° C será de:

$$R_a = 0,159\ \Omega$$

4.2- Fuerza magnetomotriz de excitación y Reacción de armadura

Para ponderar el efecto de la reacción de armadura es necesario definir bajo que modelo de máquina de trabajará, es decir si se considerará la misma como de polos salientes o no. En tal sentido pareciera que por su forma constructiva debiera utilizarse el método de la doble reactancia, ya que se trata de un generador de "polos salientes".

No obstante lo antedicho cabe observar que estos "polos salientes" no son los clásicos de las máquinas de flujo radial, ya que no están conformados por material ferromagnético blando (Fe-Si o similar) sino por material magnético duro, con lo que corresponde evaluar la permeabilidad del mismo para ver si se produce o no el efecto de polo saliente tal como está estudiado en la teoría de máquinas eléctricas.

Para ello y considerando el punto de trabajo del imán tendremos que:$\mu = 0,999$

Es decir la permeabilidad relativa del imán es prácticamente igual a la del aire, por lo que las reluctancias de los circuitos magnéticos del eje longitudinal y transversal son iguales.

En base a esta circunstancia resulta razonable utilizar (por su mayor simplicidad) el método de Potier [2] para el estudio de las fuerzas magnetomotrices ya que se trata de un circuito magnético de igual reluctancia en cualquier dirección que se tome.

4.2.1- Fuerza magnetomotriz de excitación

Para determinar el valor de la fuerza magnetomotriz de excitación se deben sumar las caídas de tensión magnética a lo largo del circuito magnético principal, así tendremos:

1) Fuerza magnetomotriz en imanes. Se considera que el tramo en el hierro es de reluctancia nula dada su permeabilidad muy elevada frente a los tramos de los imanes y del aire, entonces:$F_{im} = 9452\ A$

2) Fuerza magnetomotriz en el entrehierro. Para la F.M.M. en el entrehierro se tomará como valor de inducción el correspondiente al cálculo del flujo con lo que la F.M.M. en el entrehierro será:$F_g = 7973\ A$

Por lo que la F.M.M. total de excitación resulta:$F_f = F_{im} + F_g = 9452 + 7973 = 17425\ A$

Esta F.M.M. será entonces la responsable de sostener el flujo en la máquina y es la que en consecuencia determina la F.E.M. inducida.

4.2.2.- Reacción de armadura

Para el análisis de la reacción de armadura y dado que el generador no trabaja a frecuencia constante será necesario determinar, en lugar de lo que se emplea en la teoría clásica que es la reactancia de reacción de armadura (X_a), la inductancia representativa de la misma para luego poder aplicarlo a las distintas frecuencias de funcionamiento del generador.

Para cumplir con este objetivo se determinará la caída de tensión en la $X_a$para una corriente y frecuencia determinada y luego se calculará la inductancia respectiva. Por razones de comodidad se usará la misma frecuencia de cálculo de la F.E.M. y una corriente de 10 A.La reacción de armadura será:$F_a = 546\ A$

Y en consecuencia la inductancia equivalente de la reacción de armadura:$L_a = 2,54 * 10^{-4}\ Hy$

4.3.- Reactancia de dispersión (inductancia de dispersión)

Dadas las características geométricas de la máquina se puede considerar como inductancia de dispersión la autoinductancia de la bobina individual ya que esta es la que se opondrá al cambio de flujo y se reflejará como una caída de tensión en el circuito equivalente de la máquina.
Entonces tendremos:$L_d = 5{,}72 * 10^{-4}\ Hy$ [17]

4.4.- Reactancia sincrónica (inductancia sincrónica)
La inductancia sincrónica surgirá para las diferentes velocidades de la suma de las inductancias de dispersión y de reacción de armadura:

$$L_s = L_a + L_d = 2{,}54 * 10^{-4} + 5{,}72 * 10^{-4} = 8{,}26 * 10^{-4}\ Hy\ [18]$$

5.- MODELO CIRCUITAL DEL GENERADOR

En función de los elementos desarrollados previamente el circuito equivalente del generador será el siguiente (*Fig. 4*):

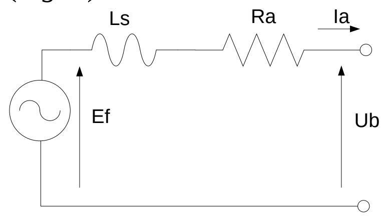


Fig. 4-Modelo circuital

Como ya se ha expresado con anterioridad y dado que la velocidad de rotación será variable se deberá calcular para cada condición de funcionamiento los valores respectivos tanto de Ef como de la Xs para poder predecir la respuesta del generador.

6.- ENSAYOS SOBRE EL GENERADO CONSTRUIDO

En función de verificar las hipótesis previamente expresadas se realizaron dos ensayos:
1) Ensayo en vacío
2) Ensayo en carga
Para realizar estos ensayos se montó el generador sobre un banco de pruebas que dispone de un motor de C.C., de manera tal de poder variar la velocidad de rotación tanto en vacío como en carga para simular las diferentes condiciones de operación del generador una vez que se encuentre acoplado al sistema de palas.

6.1.- Ensayo en vacío del generador

Para este ensayo se tomaron valores de Voltaje en función de la velocidad de rotación y se calcula la constante de generación.
Los valores adquiridos se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV. TENSIONES MEDIDAS

RPM	**UL(V)**	**Cg (V/rpm)**
200	14,1	0,0407032
300	21,4	0,0411843
400	28,6	0,0412805
500	35,7	0,0412228
600	42,9	0,0412805

Se descubre que la constante de generación es siemprenotoriamente inferior a la calculada previamente.
Esta diferencia entre latensión teórica que deberíamedirse y la realmente registrada planteadudas sobre la validez del modelo elaborado, por lo que se decide realizar una serie de determinaciones sobre la máquina para dilucidar elporqué de esta discrepancia.
Esasí que se decide determinar si lasinduccionessupuestas y ladistribucióndel campo responden o no a lo previsto, ya que si por ejemplolos imanes no tuvieranelnivel de inducción remanente o la curva de

desimantaciónfuera diferente o el campo no se desarrollara de lamanera que se supuso,los resultados bienpodrían ser totalmente diferentes.
Para ejecutar estas mediciones se utilizóungaussimetrocon sensor de efecto Hall, elcual se fue situando en diferentes posiciones para obtenerlo mas acabadamenteposibleel mapa del campo magnético de la máquina.
Enprimera instancia se realizó una medicióndel campo enel centro delentrehierro y enel radio mediodel sistema de bobinas, es decir se ubicóel sensor enla línea media del sistema tal como se usó para el cálculo (ver *Fig. 5*). Para lamedición se colocó una regla graduada de 0 a 90° en uno de losplatosdel rotor y se determinó grado a grado el valor de lainducción.
Luego se hizolamismamedición pero conel sensor colocado próximo al imán (0,5 mm de la cara delmismo)

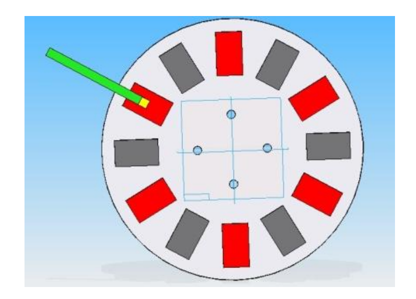


Fig. 5-Ubicación del sensor Hall

Los resultados obtenidos se traducen en las siguientes curvas (*Fig. 6*):

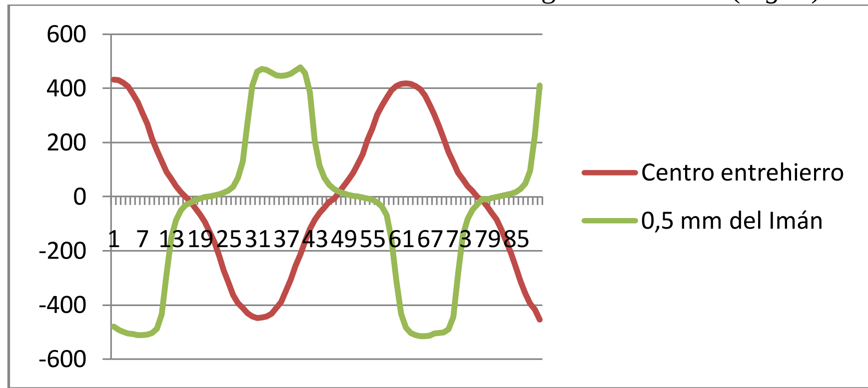


Fig. 6- Inducción en función del ángulo

La escala del eje Y están indicadas en mT y para mejor visualización se desplazaron las curvas de los dos puntos de medición indicados mas arriba.
De la curva se determina que en el centro del entrehierro la onda de campo es prácticamente senoidal y su valor pico es de: **0,454 T** y próximo al imán la inducción es prácticamente una onda cuadrada de valor máximo: **0,515 T**.
Estos valores son prácticamente iguales a los utilizados en los cálculos del modelo teórico empleado, lo que hace necesario evaluar otras alternativas como origen de la diferencia detectada
Para definir esto se realizan ahora mediciones en otros puntos del imán, pero ahora en sentido radial y muy particularmente cercano a sus extremos, es decir próximo a sus bordes en dicha dirección, de manera tal de evaluar el posible efecto de borde en sentido radial.
Dada la experiencia de la primera medición se decide solo medir en el centro del entrehierro ya que se opina que es suficientemente representativo del campo.
Los resultados obtenidos se expresan en las siguientes curvas (*Fig. 7*):

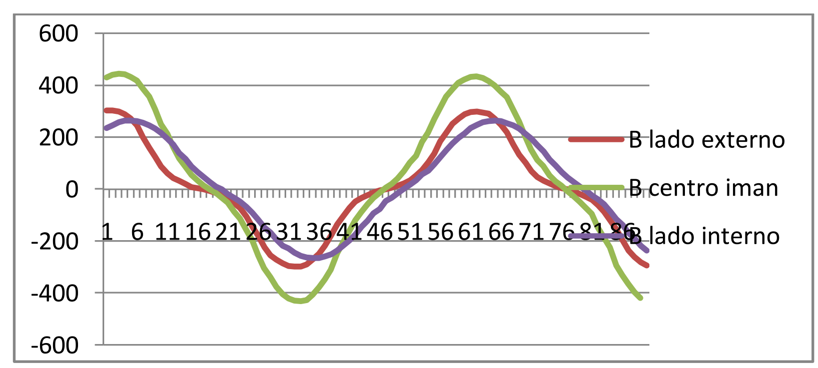


Fig. 7- Inducción en el entrehierro en sentido radial

Estas gráficas denotan un evidente efecto de borde en sentido radial, ya que las inducciones son significativamente menores en los bordes que en el centro del imán. Esta condición indica que los conductores de la bobina estatórica no está expuestos a una inducción uniforme a lo largo de su longitudactiva sino que esta es variable, y por lo tanto la tensión inducida también resultará afectada por esta variación del campo en sentido radial, resultando en una FEM inducida menor a la prevista.
Para definir exactamente cual es la incidencia de esta nueva variable en la FEM inducida es necesario determinar la ley de variación de la inducción a medida que nos vamos moviendo radialmente, para ello se mide B en sentido radial en el centro del imán y en el centro del entrehierro y variando la posición de 0 a 50 mm, es decir del borde exterior del imán hasta su borde interior.
De tal manera se obtiene la siguiente curva de variación del campo en función de la distancia radial (*Fig. 8*):

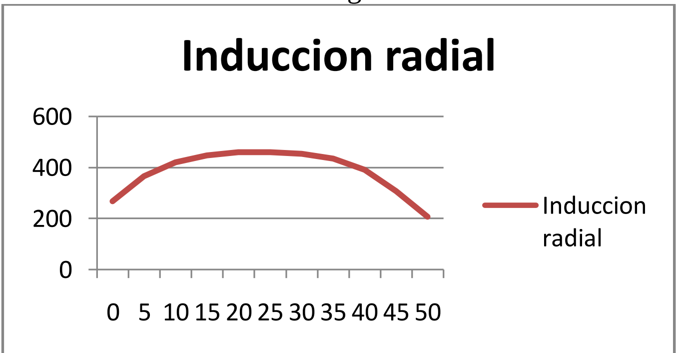


Fig. 8-Variación de inducción en sentido radial

Lo que nos da un valor medio de la inducción de: 0,383 T
Si aplicamos ahora este nuevo valor de inducción al modelo planteado mas arriba obtenemos los siguientes resultados:

TABLA V. FEM INDUCIDA POR FASE Y LINEA

Frec. (Hz)	**FEM de fase E_f (V)**	**FEM de línea E_l (V)**
40	17,16	29,72

Si consideramos la tensión de fase, la máquina en cuestión tendrá una “constante de generación” de:

$$C_g = \frac{E_f}{n} = \frac{17,16}{400} = 0,0429\ V/rpm$$

Como se observa los valores obtenidos utilizando este nuevo valor de inducción resultan comparables a los obtenidos en los ensayos, por lo que se infiere que se deberá incluir en los cálculos un nuevo “factor” tal como los de paso y distribución que contemple esta distribución no uniforme del campo magnético en el sentido radial.

7.- ENSAYO EN CARGA

Para el ensayo en carga se parte del criterio de estudiar el generador de manera orientada a la aplicación específica del mismo, es decir de un generador cuya función primaria además de suministrar energía en tiempo real es la de servir para cargar un banco de baterías, de forma tal que en caso de falta de viento se puedan utilizar las mismas para los consumos básicos.

Es así que se conecta el generador a un rectificador trifásico en puente y a la salida de este se colocan resistencias de carga variables de manera de poder regular la corriente demandada por dicha carga, manteniendo siempre la tensión aproximada de 27 V de C.C. (carga de flote de baterías de 24 V). Es decir para las diferentes velocidades de rotación se ajustarán las resistencias de carga de forma que la tensión en todo momento sean los 27 V señalados, los resultados se han volcado en la TABLA VI.

TABLA VI. RESULTADOS DEL ENSAYO EN CARGA Vs. TEORICO MODELO

	Ensayoen carga delgenerador							**Valores s/ modelo**		**Dif.**
Vel. (rpm)	**U0 (fase)**	**Corr. (A)**	**Caidae n Ra**	**f (Hz)**	**Xs (Ω)**	**Caidae nXs**	**Uc (fase)**	**U0 (modelo)**	**Uc (modelo)**	**Δ (%)**
297	14,01	2,4	0,43	29,70	0,16	0,37	13,39	13,83	13,39	-1,29
328	15,47	5,5	0,98	32,80	0,17	0,95	14,20	15,22	14,21	-1,65
377	17,78	10,6	1,90	37,70	0,20	2,10	15,47	17,50	15,46	-1,61
403	19,01	13,6	2,43	40,30	0,21	2,88	15,99	18,65	15,96	-1,89
439	20,71	16,5	2,95	43,90	0,23	3,80	16,97	20,29	16,92	-2,03
477	22,50	20,8	3,72	47,70	0,25	5,21	17,90	22,24	17,77	-1,15
560	26,41	27,3	4,89	56,00	0,29	8,03	19,51	25,69	19,19	-2,75

Donde la columna = Δ (%) representa la discrepancia entre el valor que se obtiene del modelo planteado y la medición real del generador.

8.- CONCLUSIONES

En base a lo planteado en las páginas anteriores podemos arribar a las siguientes conclusiones:

1) La metodología de cálculo habitualmente empleada en la literatura clásica para el análisis teórico de la FEM inducida en los generadores sincrónicos es perfectamente aplicable a los generadores de flujo axial a imanes permanentes. Se debe eso si realizar la salvedad de que se tienen que considerar los fenómenos de distribución particular del flujo magnético que tiene estos generadores, tal como se ha visto en las curvas de los ensayos respectivos.
2) El modelo circuital elaborado (Reactancias y Resistencias) resultan también representativos de los verdaderos valores presentes en la máquina real, dado que la diferencia entre el valor teórico y el del ensayo se encuentran dentro de los rangos de diferencia esperables (promedio menor al 2%).
3) Una cuestión que surgió del estudio es el hecho de que la reacción de armadura, al contrario de lo que sucede en las máquinas máquinas sincrónicas habituales, es que esta tiene un efecto casi despreciable, es decir no altera sustancialmente el valor de la FMM resultante en el entrehierro, por lo que la resistencia de los arrollamientos tiene una influencia significativa al contrario de lo habitualmente esperado en una máquina sincrónica, donde generalmente se desprecia.
4) Respecto del estudio de los generadores para ser acoplados a turbinas eólicas se plantean las siguientes cuestiones a desarrollar en futuros trabajos:
    a) Mejoramiento de las características del generador de flujo axial: probando por ejemplo la construcción de bobinas trapezoidales que acompañen mejor la variabilidad del paso polar de la máquina o la incorporación de núcleos de hierro en la bobinas estatóricas.
    b) Estudio del efecto de borde radial para diferentes geometrías de imanes y bobinas de manera de cuantificar lo mejor posible este nuevo factor, e incorporarlo a las ecuaciones de diseño, en fase teórica y posterior validación experimental.

9.-BIBLIOGRAFÍA

[1] Hugh Pigott, *A Wind Turbine Recipe Book: The Axial Flux WindmillPlans,* Scoraigwind, 2009

[2] Alexander S. Langsdorf, *Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna,* Mc GrawHill,1967

[3] M.P. Kostenko, L.M. Piotrovski, *Máquinas Eléctricas Tomo II*